



Proyecto Fin de Carrera

OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE LA DEMANDA CONSIDERANDO EL COSTE DE LA ELECTRICIDAD Y LA SATISFACCIÓN DEL CONSUMIDOR

Autor

Jorge Rodríguez Ibáñez

Directores

José Luis Bernal Agustín
Rodolfo Dufo López

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
Zaragoza, Noviembre de 2014

OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE LA DEMANDA CONSIDERANDO EL COSTE DE LA ELECTRICIDAD Y LA SATISFACCIÓN DEL CONSUMIDOR

RESUMEN

El principal objetivo de este proyecto es la optimización del coste de la factura eléctrica y de la satisfacción de un consumidor residencial.

Para esta tarea se han desarrollado modelos matemáticos para dos objetivos (coste y satisfacción del consumidor). El concepto de optimalidad de Pareto ha sido también utilizado ya que es posible considerar la satisfacción de un consumidor como un objetivo independiente a ser optimizado y, simultáneamente, minimizar el coste de la factura eléctrica. Para esta optimización multiobjetivo se ha empleado un algoritmo evolutivo implementado en Matlab (NSGA-II).

Con la herramienta utilizada se han estudiado varios casos residenciales en los cuales se han ido añadiendo consumos, algunos de ellos muy relevantes dado el valor de la potencia que consumen.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos y alcance.....	3
1.3 Herramientas utilizadas.....	4
1.4 Organización de la memoria.....	4
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
2.1 Optimización multiobjetivo y concepto de optimalidad de Pareto.....	5
2.2 Precios voluntarios.....	5
2.3 Algoritmos evolutivos.....	7
2.3.1 Población.....	7
2.3.2 Selección.....	7
2.3.3 Crossover.....	8
2.3.4 Mutación.....	8
3. HERRAMIENTA DESARROLLADA.....	9
3.1 Coste de la electricidad.....	9
3.2 Cálculo del coste.....	9
3.3 Cálculo de la satisfacción del usuario.....	9
4. CASOS DE ESTUDIO.....	11
4.1 Caso residencial sin uso de vehículo eléctrico.....	11
4.2 Caso residencial con uso de vehículo eléctrico.....	15
4.3 Caso residencial con vehículo eléctrico y aire acondicionado.....	18
5. CONCLUSIONES.....	21
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	22
APÉNDICES.....	23
A.1 Precios voluntarios.....	24
A.2 Algoritmos evolutivos.....	29
A.2.1 Fundamentos.....	29
A.2.2 NSGA-II.....	30
A.3 MATLAB.....	34
A.3.1 ¿Qué es MATLAB?.....	34

A.3.2 Representación gráfica de funciones.....	35
A.3.3 Funciones empleadas en MATLAB.....	39
A.4 Resultados casos de estudio.....	40
A.4.1 Caso residencial 1.....	40
A.4.2 Caso residencial 2.....	42
A.4.3 Caso residencial 3.....	44

1. INTRODUCCIÓN

En este primer apartado se comentan brevemente las principales pautas de este proyecto, empezando por la motivación que ha llevado a realizarlo. En segundo lugar se citan los objetivos que se han establecido y por último se describe como está organizada la memoria.

1.1 Motivación

Las redes eléctricas actuales no han cambiado desde que se concibieran a finales del siglo XIX. La idea básica consiste en hacer llegar grandes cantidades de energía a los usuarios finales en todo momento, tanto si lo necesitan como si no. Además, se trata de una relación unidireccional: los consumidores son receptores pasivos y no pueden participar como posibles productores domésticos.

Otra de las desventajas de esta configuración es su baja eficiencia, con el consiguiente impacto medioambiental que supone la producción energética: algunas estimaciones hablan de pérdidas de hasta el 20% de la energía que distribuye, sin contar los fallos en el servicio. Estas fugas eléctricas pueden suponer al cabo del año miles de millones de euros desperdiciados.

Además, la demanda de energía está aumentando en muchos países debido al desarrollo económico e industrial. Como consecuencia, muchos gobiernos están trabajando para proporcionar un sistema eléctrico de confianza. Sin embargo, los problemas relacionados con restricciones en el precio de la electricidad como el precio máximo o la tasa fija han producido una diferencia entre los costes de generación eléctrica marginal y el coste de la energía eléctrica consumida. Esto aumenta el crecimiento de la demanda más rápido que la capacidad de generación. Además, la inestabilidad de los precios de venta de electricidad afecta a la capacidad del minorista de generar beneficio e incrementa la inversión de forma incierta e imprevisible.

La implementación de programas de respuesta de la demanda requieren que la red eléctrica posea una tecnología que permita la comunicación entre los consumidores y el minorista; este concepto es el conocido como red inteligente o "Smart grid" [1].

El concepto de red inteligente ha sido usado durante varios años. Este tipo de red tiene la capacidad de medir automáticamente el consumo de energía y permite una comunicación bidireccional entre el consumidor y la compañía eléctrica. Una red eléctrica inteligente es aquella capaz de integrar las acciones de todos los agentes, productores o consumidores, para distribuir energía de forma eficiente, sostenible, rentable y segura. Lo que hace a la red "inteligente" es la tecnología digital que permite la comunicación bidireccional entre la empresa suministradora de electricidad y sus clientes. Utiliza productos y servicios innovadores, así como tecnologías avanzadas de monitorización, control, y comunicación, que aportan beneficios tanto al medio ambiente como a los clientes:

- Aumentan el nivel de fiabilidad y calidad en el suministro de energía eléctrica. Cuando hay una avería, las tecnologías de la red inteligente pueden detectar y aislar el problema y contribuir a que la recuperación de la electricidad sea rápida y se desarrolle estratégicamente, devolviendo la electricidad a los servicios de emergencia en primer lugar, por ejemplo. Además, la red inteligente saca mayor provecho de los generadores de energía propiedad del cliente cuando no se dispone de electricidad procedente de la compañía eléctrica.

- Facilitan a los clientes instrumentos que les permiten optimizar su propio consumo eléctrico y mejorar el funcionamiento del sistema global (gestión activa de la demanda). Las redes inteligentes dan al usuario la información y las herramientas necesarias para tomar decisiones sobre su uso de la energía: el cliente podrá ver cuánta electricidad consume, cuándo la utiliza y cuánto le cuesta, y ahorrar dinero generando su propia energía y eligiendo el mejor momento para consumir electricidad.
- Contribuyen a mantener la sostenibilidad ambiental, integrando la generación distribuida de fuentes renovables, y desplegando la infraestructura de recarga para la movilidad eléctrica, contribuyendo a la reducción de las emisiones de CO₂. Facilitan el almacenamiento de la electricidad.
- Mejoran la eficacia en la distribución de los flujos de energía y la flexibilidad en la gestión de los picos de demanda, con la consiguiente disminución de las necesidades de nuevas instalaciones de generación.

Estas características operacionales permiten el desarrollo de programas de gestión desde el lado de la demanda [2] basados en el precio (DSM). En España y otros países, la mayoría de los consumidores residenciales pagan un precio fijo por kWh, sin importar la hora del día. Si un DSM basado en el precio se aplicara, sería posible mover o cambiar los consumos de horas pico a horas no pico, reduciendo así la factura eléctrica en el consumidor.

España ha desarrollado dos programas DR para los grandes consumidores industriales: System-led y Price-led. En los programas System-led, los clientes son capaces de participar voluntariamente en los programas DR y después el operador del sistema de transmisión (TSO) puede solicitar a estas industrias que limiten su demanda en periodos de 45 minutos a 12 horas. En los programas Price-led, el operador del sistema (TSO) puede aplicar ratios TOU en siete periodos del año. Recientemente, se llevó a cabo un análisis de un modelo DR considerando un consumidor residencial de Zaragoza, España, durante un típico día de verano. Asumiendo que la casa estaba equipada con una televisión, un sistema de aire acondicionado, un ordenador, varias bombillas, aplicaciones y un vehículo eléctrico. Los resultados para un día de verano fueron que para una adecuada utilización de los diferentes consumos la factura podía reducirse hasta un 22%.

Además, el gobierno ha cambiado la metodología del cálculo de precios que se aplican a:

- A los clientes que tenían Tarifa de Último Recurso (TUR) con una potencia contratada inferior o igual a 10 kW.
- A los clientes con Bono Social.
- A los clientes con potencia contratada superior a 10kW (sin derecho a TUR), que no disponen de un contrato con una Comercializadora en Mercado Libre (tarifa disuasoria).

Con la aprobación por parte del gobierno del nuevo sistema para el cálculo de la electricidad, los clientes acogidos al Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor [3] (PVPC –antigua TUR) pueden elegir entre tres opciones:

- Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor (PVPC)

Este precio lo calcula Red Eléctrica de España (REE) de forma diaria, en función de:

- Los precios por hora de la energía en el mercado.
- Aplicando el perfil de un consumidor promedio.

Es decir, se utilizan los precios reales del mercado diario de la energía y no un precio trimestral, como se hacía antes. El perfil de consumo promedio es un patrón de consumo que utiliza Red Eléctrica de España (REE) para calcular el precio de la luz.

El precio de la luz puede cambiar cada hora, según evolucione el mercado eléctrico, por lo que nunca será igual en tus facturas y no es posible conocerlo con antelación. Con esta alternativa, el importe de tus facturas dependerá de otros factores adicionales al nivel de consumo, como el clima o la demanda de la energía.

Si se encontrara con la anterior tarifa de Último Recurso (TUR) y no se realizara ninguna gestión, este será el sistema que se aplicará.

- **Precio Fijo en Mercado Regulado**

Se establece previamente y es fijo y estable durante 12 meses. Con esta alternativa conoces el precio que vas a pagar, no depende de la evolución en el mercado de la electricidad, por lo que las variaciones en el importe de tu factura dependerán solo del nivel de consumo.

Esta alternativa puede resultar más cara, pero sabes de antemano cual será el precio de la luz que vas a pagar. En este caso, si deseas darte de baja antes de que finalice el año tendrías que pagar una penalización.

- **Ofertas en el Mercado Libre:**

La tercera opción es contratar una tarifa en mercado libre y que incluyen las siguientes ventajas:

- Precios más competitivos que el Precio Fijo.
- Precios conocidos de antemano y estables como mínimo durante un año.
- Sin compromiso de permanencia, ni penalizaciones.
- Se puede contratar servicios adicionales que pueden aportar importantes descuentos.

1.2 Objetivos y alcance

La idea en la realización de este proyecto es la de realizar una optimización de tal forma que una vez resuelto el problema, el usuario disponga de los datos suficientes para tomar una decisión óptima en su caso de estudio.

Los objetivos son:

- Plantear casos de consumo doméstico con varios dispositivos que posean un determinado consumo de energía durante un intervalo de tiempo.
- Definir las funciones objetivo correspondientes al coste y a la satisfacción del consumidor.
- Plantear un problema de optimización multiobjetivo considerando dos objetivos: coste de consumo de energía eléctrica a lo largo de un día y satisfacción del consumidor.
- Aplicar una técnica de optimización multiobjetivo con el fin de minimizar el coste y maximizar la satisfacción. La técnica aplicada hará uso del concepto de optimalidad de Pareto.

- Obtener conclusiones a partir de los resultados alcanzados y plantear posibles mejoras respecto de la técnica empleada y problema multiobjetivo planteado.

1.3 Herramienta utilizada

La principal herramienta utilizada en este proyecto ha sido MATLAB. En él, se han editado las funciones objetivo tanto de coste como de satisfacción y se ha implementado el algoritmo genético NSGA-II adecuándolo a nuestro problema en cuestión. También se ha hecho uso del EXCEL en el que hemos guardado la información proporcionada por REE sobre el precio horario y poder importar los datos a MATLAB.

1.4 Organización de la memoria

La organización del documento es la siguiente: en primer lugar se describen los fundamentos teóricos en los que se ha basado el presente proyecto, que servirán de base para tenerlos en cuenta adecuadamente en los cálculos posteriores. A continuación se explican cómo se han calculado las funciones objetivo necesarias para ejecutar el algoritmo. En el apartado 4 se describen los casos de estudio y los resultados que se han obtenido al introducir los datos en el programa. Finalmente se enuncian las conclusiones extraídas del conjunto trabajo, y se citan las fuentes consultadas como bibliografía. Al final de la memoria hay una serie de apéndices que incluyen información extra para la completa comprensión del proyecto.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Optimización multiobjetivo y optimalidad de Pareto

En un problema de optimización se trata de encontrar una solución que represente el valor óptimo para una función objetivo. En el caso más sencillo se tendrá un único objetivo, aunque naturalmente la mayor parte de los problemas de optimización del mundo real son multiobjetivo. Se puede decir que la verdadera optimización es optimización multiobjetivo, esto es, suelen tener dos o más funciones objetivo que deben satisfacerse simultáneamente y que posiblemente están en conflicto entre sí. Sin embargo, a fin de simplificar su solución, muchos de estos problemas tienden a modelarse como mono-objetivo usando solo una de las funciones originales y manejando las adicionales como restricciones.

El problema del multiobjetivo es que normalmente no existe un único elemento que produzca un óptimo de forma simultánea para cada uno de los objetivos. Esto se deberá a la existencia de conflictos entre objetivos que harán que la mejora de uno de ellos de lugar a un empeoramiento en algún otro. El concepto de óptimo es ahora relativo y será necesario decidir de alguna forma cual es la mejor solución o cuales son las mejores soluciones al problema.

El problema es por tanto buscar un conjunto de alternativas que proporcionan soluciones potenciales y representan un compromiso entre los diferentes objetivos denominado conjunto de Pareto o conjunto No Dominado. Hay que aclarar que una solución domina a otra si es mejor o igual en cada uno de los objetivos y al menos mejor en uno de ellos. Todos los vectores de decisión que no son dominados por ningún otro se denominan Pareto-optimales y con ellos se construye la frontera de Pareto.

2.2 Precios voluntarios

La nueva tarifa del PVPC [4], seguirá la misma regulación que tenía la Tarifa de Último Recurso. El Precio Voluntario al Pequeño Consumidor, en principio, supondrá un incremento en los peajes de acceso [5]. A esta nueva tarifa, el Precio Voluntario al Pequeño Consumidor seguirá estando disponible para los mismos clientes que la antigua Tarifa de Último Recurso, aquellos que tengan contratada una potencia eléctrica inferior a 10 kW.

Los consumidores que quieran acogerse a la tarifa regulada por el Gobierno podrán escoger qué modalidad de tarifa eléctrica es más conveniente para su vivienda. Los distintos tipos de tarifas son los siguientes:

- PVPC sin discriminación horaria que se caracteriza porque el precio del kWh es igual para todas las horas del día.
- PVPC con discriminación horaria es aquella donde las horas nocturnas son más baratas que las diurnas.
- En gas natural no existen distintas modalidades que el cliente pueda elegir.

Los consumidores que quieran contratar el PVPC deberán conocer las ventajas que ofrece esta tarifa y que serán los siguientes:

- El Gobierno pretendía proteger a los consumidores frente a la liberalización del mercado.

- El precio se mantiene estable aunque se modificará trimestralmente.

Los usuarios que quieran acogerse regulada también deberán saber que existe un inconveniente muy importante. Las comercializadoras de mercado libre ofrecen tarifas con descuentos que pueden ser más ventajosos para el consumidor.

Los precios voluntarios para el pequeño consumidor se determinarán a partir del peaje de acceso asociado a cada punto de suministro y estarán compuestos por un término de potencia, un término de energía del peaje de acceso, un término correspondiente al coste horario de la energía y, en su caso, un término de la energía reactiva.

El término de potencia del PVPC consumidor, TPU, expresado en euros/kW y año, será el término de potencia del peaje de acceso y cargos más el margen de comercialización, calculado de acuerdo con la siguiente fórmula:

- $TPU = TPA + MCF$

Donde:

TPU: Término de potencia del PVPC.

TPA: Término de potencia del peaje de acceso y cargos de aplicación al suministro, expresado en euros/kW y año.

MCF: Margen de comercialización, expresado en euros/kW.

El término de energía del PVPC en el periodo tarifario *p*, TEUp, expresado en euros/kWh, será igual al término de energía del correspondiente peaje de acceso y cargos, calculados de acuerdo con la siguiente fórmula:

- $TEU_p = TEA_p$

Siendo:

p: Subíndice que identifica cada período tarifario del peaje de acceso.

TEUp: Término de energía del PVPC en el periodo tarifario *p*, según corresponda.

TEAp: Término de energía del peaje de acceso y cargos en el periodo tarifario *p*, según corresponda, de aplicación al suministro, expresado en euros/kWh.

El término de coste horario de energía del PVPC, TCUh, será igual a la suma del término de coste de producción, de acuerdo con la siguiente fórmula:

- $TCUh = (1 + PERDh) \times CPh$

Donde:

TCUh: Término de coste horario de energía del PVPC en cada hora, expresado en euros/kWh.

CPh: Coste de producción de la energía suministrada en cada hora expresado en euros/kWh.

PERDh: Coeficiente de pérdidas del peaje de acceso de aplicación al suministro en la hora *h*.

En su caso, el término de energía reactiva, expresado en euros/kVArh, que se determinará de acuerdo a las condiciones que se establecen para la aplicación de este término en el Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

2.3 Algoritmos evolutivos

Los algoritmos evolutivos multiobjetivo [6], [7] son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización considerando simultáneamente varios objetivos. Están basados en el proceso genético de los organismos vivos. A lo largo de las generaciones, las poblaciones (conjuntos de soluciones) evolucionan en la naturaleza de acorde con los principios de selección natural y la supervivencia de los más fuertes.

En la naturaleza los individuos de una población compiten entre sí en la búsqueda de recursos. Aquellos individuos que tienen más éxito en sobrevivir y en atraer compañeros tienen mayor probabilidad de generar un gran número de descendientes. De esta manera, las especies evolucionan unas características cada vez mejor adaptadas al entorno en que viven.

Por imitación de este proceso, los algoritmos evolutivos son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. La evolución de dichas soluciones hacia valores óptimos del problema depende en buena medida de una adecuada codificación de las mismas. Trabajan con una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado. Cuanto mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado. Este cruce producirá nuevos individuos – descendientes de los anteriores – los cuales comparten algunas de las características de sus padres.

Así a lo largo de las generaciones las buenas características se propagan a través de la población. Favoreciendo el cruce de los individuos mejor adaptados, van siendo exploradas las áreas más prometedoras del espacio de búsqueda. Si el algoritmo evolutivo ha sido bien diseñado, la población convergerá hacia una solución óptima del problema.

A continuación se describen, brevemente, los parámetros iniciales más importantes y necesarios de un algoritmo evolutivo. Para más información se recomienda acudir al apéndice “A.2 Algoritmos evolutivos”.

2.3.1 Población

Una cuestión que uno puede plantearse es la relacionada con el tamaño idónea de la población. Parece intuitivo que las poblaciones pequeñas corren el riesgo de no cubrir adecuadamente el espacio de búsqueda, mientras que al trabajar con poblaciones de gran tamaño puede acarrear problemas relacionados con un excesivo coste computacional.

En la práctica, por falta de información, se elige la población inicial al azar, teniendo en cuenta que la población debe ser lo más variada posible. A veces el conocimiento específico de las características del problema puede ayudar a formar una población inicial factible con algún individuo cercano al óptimo.

2.3.2 Selección

El principio detrás de los algoritmos evolutivos es esencialmente la selección natural de Darwin. La selección provee la fuerza motora a un algoritmo evolutivo. La presión selectiva es crítica. En un extremo, la búsqueda terminará prematuramente; mientras que en el otro, el progreso será más lento que el necesario. Típicamente, se sugiere una baja presión selectiva al comienzo de la ejecución de los algoritmos evolutivos en favor de una amplia exploración del espacio de búsqueda, mientras se

recomienda una alta presión selectiva al final, para explotar las regiones más prometedoras del espacio de búsqueda.

2.3.3 Crossover

El crossover es el principal operador genético. Es un operador sexual. Trabaja sobre dos cromosomas a la vez y genera hijos al recombinar las características de los cromosomas. Una forma simple de realizar el crossover consiste en elegir de forma aleatoria un punto de corte, y generar el hijo combinando el segmento de un padre a la izquierda del punto de corte con el segmento a la derecha del otro padre. El rendimiento del algoritmo evolutivo depende, en gran parte, del comportamiento del operador de crossover usado.

La probabilidad de crossover se define como la relación entre el número de hijos producidos en cada generación y el tamaño de la población. Esta probabilidad controla el número esperado de cromosomas que se someten a la operación de crossover. Una alta probabilidad de crossover permite una mayor exploración del espacio de soluciones, reduciendo la probabilidad de quedarse atascado en un óptimo local, pero si la probabilidad es muy alta, provoca un gran desperdicio en cuanto a cantidad de tiempo de computación en la exploración de regiones no prometedoras del espacio de soluciones.

La función principal del crossover es que los segmentos significativos de diferentes padres se combinen para producir un nuevo individuo que se beneficie de las combinaciones de las características de ambos padres.

2.3.4 Mutación

La mutación es un operador de los algoritmos evolutivos que produce cambios aleatorios. Una forma simple de realizar la mutación es alterar uno o más genes. En un algoritmo evolutivo, la mutación cumple el rol de reposición de genes perdidos en la población durante el proceso de selección y de provisión de aquellos genes que no están presentes en la población inicial.

La probabilidad de mutación se define como el número total de genes en la población que deben ser mutados. La probabilidad de mutación controla el porcentaje en el cual se introducen nuevos genes en la población. Si es muy baja, muchos genes que podrían haber sido producidos nunca se prueban. Si es muy alta, habrá mucha variación aleatoria, los hijos comenzarán a perder su parecido con los padres, y el algoritmo perderá la habilidad de aprender de la historia de la búsqueda.

3. HERRAMIENTA DESARROLLADA

Se explican a continuación los aspectos y factores que se han tenido en cuenta para la realización del proyecto. Matlab [8] se ha utilizado para el desarrollo de la herramienta.

3.1 Coste de la electricidad

Los datos de coste de la energía eléctrica se han extraído de los datos públicos de los PVPC [3] contenidos en la página oficial de REE (red eléctrica España) que contienen el precio de la electricidad para cada hora del día. REE es el transportista único y operador del sistema eléctrico español. REE opera en el sistema eléctrico, tanto en la península como en sistemas no peninsulares, garantizando en todo momento la seguridad y la continuidad del suministro. Además, Como gestor de la red de transporte, Red Eléctrica es responsable del desarrollo y ampliación de la red, de realizar su mantenimiento, de gestionar el tránsito de electricidad entre sistemas exteriores y la península y de garantizar el acceso de terceros a la red de transporte en condiciones de igualdad.

Por tanto, obtendremos un vector que incluirá el precio del MWh que es lo que utilizará el programa para calcular los costes de funcionamiento de las aplicaciones del usuario y uno de los objetivos a minimizar.

3.2 Cálculo del coste

Este es el primer objetivo a optimizar [2], ya que minimizando este objetivo conseguimos reducir así la factura eléctrica del usuario. Para ello, será necesario que el usuario disponga de los precios de la electricidad programados cada hora para el día siguiente. El objetivo se formula como sigue:

$$f_1 = \sum_{h=1}^{h=24} \left[E_p(h) \left(\sum_{n=1}^{n=N} P d_n(h) \right) \right]$$

Donde $E_p(h)$ son los precios programados de la electricidad en la hora j para el día siguiente, $P d_n(h)$ es la potencia demandada por la aplicación n en la hora h , y N es el número de aplicaciones totales.

A esta función hay que añadirle un coste fijo, referido al precio diario de la potencia contratada en la compañía eléctrica.

3.3 Cálculo de la satisfacción del usuario

El segundo objetivo [2] a optimizar está basado en las actividades programadas por el usuario para el día siguiente y puede ser formulado de la siguiente manera:

$$f_2 = \sum_{h=1}^{h=24} \left[\sum_{n=1}^{n=N} |Sol_n(h) - Sc_n(h)| \right]$$

Donde $Sol_n(h)$ tiene de valor 1 si la solución que es evaluada indica que el dispositivo n debe estar en uso en la hora h , en otro caso su valor será 0.

$Sc_n(h)$ tendrá de valor 1 si el usuario programa el uso de la aplicación n en la hora h , en cualquier otro caso su valor será 0.

Se puede observar que el máximo de satisfacción del usuario se obtendrá cuando la función valga cero, esto es, en el caso de que los usos de las aplicaciones se lleven a cabo en las horas programadas por el usuario. La función nunca puede ser negativa. Por tanto f_2 es un indicador de la no satisfacción del usuario.

También, el usuario puede imponer restricciones, haciendo posible ajustar el uso de ciertas aplicaciones independientemente de los costes incurridos de tal forma que limite las soluciones posibles.

4. CASOS DE ESTUDIO

En este apartado se describen y analizan diversos casos residenciales con diferentes consumos. En cada apartado se intenta simular de forma real una típica vivienda con el fin de minimizar el coste y optimizar la satisfacción en la programación.

Hay que comentar tres aspectos importantes en las simulaciones realizadas:

- Debido a la ausencia de información sobre perfiles de carga de los consumos se ha supuesto que las aplicaciones mantiene un consumo de energía constante a lo largo del tiempo. De esta forma se ha simplificado la resolución del proyecto.
- Se han periodificado las horas del día en intervalos de 15 minutos. La existencia de aplicaciones con duraciones inferiores a la hora han forzado a una discretización más exhaustiva.
- Se han empleado los datos del coste de electricidad pertenecientes a tarifas nocturnas. Este tipo de tarifa se caracteriza por una mayor diferencia de precio en tramos de horas valle y de horas punta y con la que se conseguirá más variación en los resultados.

4.1 Caso residencial 1

Los consumos considerados en este ejemplo han sido:

Dispositivos	Potencia (kW)	Duración (h)	Hora mínima de comienzo	Hora máxima de comienzo
Cocina1	2.5	2	≥ 8	≤ 15
Lavavajillas1	0.5	1	$\geq \text{Cocina1} + 2$	≤ 23
Cocina2	2.5	2	$\geq \text{Cocina1} + 2$	≤ 22
Lavavajillas2	0.5	1	$\geq \text{Lavavajillas1} + 1$ $\geq \text{Cocina2} + 2$	≤ 24
Lavadora	0.5	1	-	≤ 22.75
Secadora	2	0.25	$\geq \text{Lavadora} + 1 \text{ h}$	≤ 23.75
Plancha	1	0.5	$\geq \text{Secadora} + 0.25 \text{ h}$	≤ 24

Tabla 1. Consumos del caso 1.

Los índices de los consumos como la cocina y el lavavajillas indican el número de usos que se hace de estas aplicaciones. Además se han introducido restricciones horarias en el empleo de los electrodomésticos y utilitarios teniendo en cuenta, por ejemplo, que el lavavajillas se usa después de utilizar la cocina y que, evidentemente, no se puede emplear la cocina para dos funciones a la vez. Además antes de poder emplear la plancha toda la ropa de estar secada y que antes de secarla es necesario lavarla.

El precio horario de la electricidad se ha obtenido de la página de red eléctrica España, que corresponde al término de facturación de potencia activa en tarifa nocturna 2.0.DHA para el 1 de abril de 2014.

El siguiente paso es realizar una programación tipo de los consumos por parte del usuario. En la Tabla 2 se indica esa programación.

Programación usuario	Hora de comienzo	Hora de fin
Cocina1	12:00	14:00
Lavavajillas1	15:00	16:00
Cocina2	18:30	20:30
Lavavajillas2	22:00	23:00
Lavadora	17:00	18:00
Secadora	18:00	18:15
Plancha	18:30	19:00

Tabla 2. Programación deseada por el usuario en el caso 1.

Es decir, una hora adecuada para comer son las 14:00. Una hora adecuada para cenar son las 21:00 y que el planchado, lavado y secado de la ropa puede hacerse a mitad de la tarde.

Una vez programadas las aplicaciones podemos calcular lo que nos va a costar ayudándonos del precio en kWh para este día.

Aplicando la ecuación para el cálculo del coste de la energía utilizada nos da un valor de:

Coste con la programación del usuario = 1.141 €/día.

A este valor hay que añadirle un coste fijo, el referido a la potencia contratada. Actualmente el valor por kW contratado y mes es 3.15 €/kW mes y si lo indicamos en días el valor es 0.105€/kW día.

Ahora bien, comprobando la programación del usuario se deduce que la potencia máxima necesaria para la instalación será la suma de la potencia de la cocina y la plancha porque coinciden en el tiempo. Por tanto la potencia máxima requerida es 3.5 kW. Es decir, el mínimo a contratar serán 4.6 kW. Si calculamos ahora el coste total no sale un valor de:

Coste total = 1.141 €/día + 4.6 kW*0.105€/kW = 1.624 €/día.

Ahora ejecutamos el algoritmo con una población inicial de 40 individuos y un número de generaciones de 100. El NSGA-II nos proporciona una población inicial, tal y como se muestra en la Fig. 1.

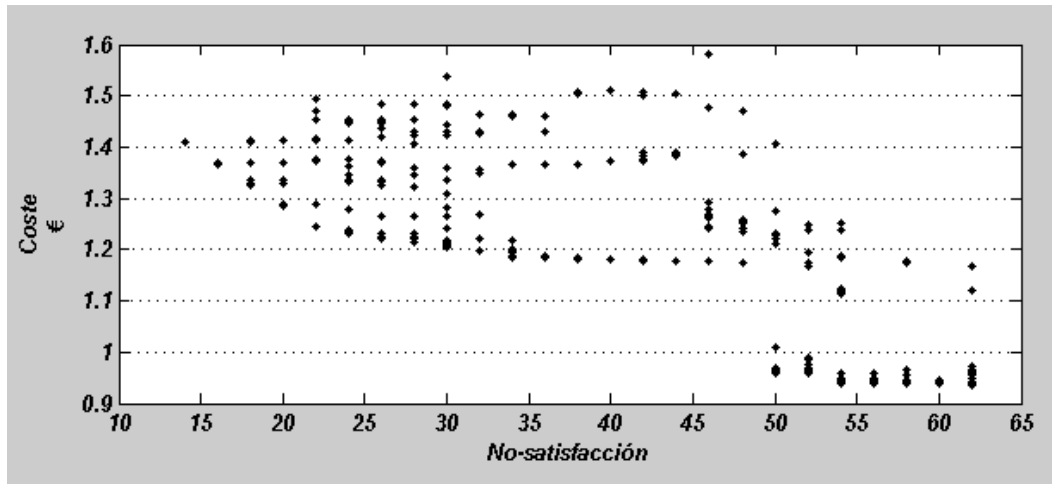


Fig. 1. Población inicial obtenida con el algoritmo NSGA-II para el caso 1.

Una vez realizadas todas las iteraciones del algoritmo, las soluciones obtenidas para este caso son las que se muestran en la Fig. 2.

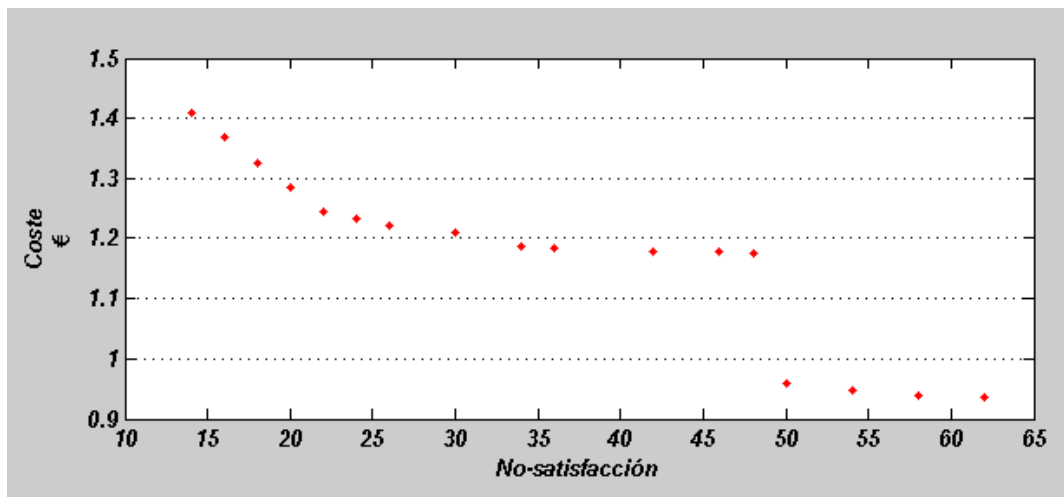


Fig. 2. Soluciones obtenidas con el algoritmo NSGA-II para el caso 1.

Los valores numéricos de las variables de decisión (electrodomésticos) referidos a este caso pueden consultarse en el [apéndice 4.1](#). Con ellos podremos comparar el coste, ahorro y satisfacción de cada una de las soluciones.

Podemos observar en la gráfica que existe un salto de 20 céntimos entre dos de las soluciones cuyos valores de satisfacción son muy similares. Este tipo de cambios se debe a que las tarifas nocturnas se caracterizan por presentar precios horarios muy bajos en la madrugada (horas valle) mientras que en el resto del día los precios son más elevados. Estudiando las dos soluciones se observa que el motivo del salto se debe a que en una de las aplicaciones, la lavadora, está programada de madrugada mientras que en la otra está programada a mitad del día.

También podemos observar zonas planas en las que el coste prácticamente no varía mientras que la no-satisfacción sí lo hace, como por ejemplo entre los valores 34 y 48. Esto se debe a que con pequeños cambios en la programación, como por

ejemplo media hora, que provoca una variación mínima en el precio de la electricidad, mientras que el de la satisfacción sí puede variar considerablemente.

Ahora vamos a comparar en términos porcentuales las variaciones de las soluciones más relevantes. Para ello se han seleccionado tres puntos: el de menor coste, el que genera mayor satisfacción en el usuario y un punto central. Así podemos comparar los valores de los objetivos en esas soluciones con la propuesta realizada por el usuario. Además, ahora que conocemos todos los valores numéricos podemos realizar una comparación porcentual del ahorro (Tabla 3).

	Coste en euros	Índice de no-satisfacción	Ahorro (%)
Solución 1	0.936	62	42.36
Solución 2	1.209	30	25.55
Solución 3	1.408	14	13.30

Tabla 3. Comparación de los objetivos de tres soluciones del caso 1.

Como podemos comprobar, a costa de perder satisfacción en la programación de las aplicaciones del hogar concluimos que podemos ahorrar más de un 40% en la factura. Este porcentaje es tan alto debido a la diferencia de precios entre las horas valle y horas punta de las tarifas nocturnas.

Para decidir qué solución podría ser la más adecuada, el usuario puede indicar unos límites en ambos objetivos, y estudiar las soluciones que se encuentren dentro de esos límites. Por ejemplo, si el coste debe estar entre 1.2 y 1.3 € y el índice de no satisfacción entre 18 y 32, se deberían estudiar las soluciones que se muestran en la Fig. 3.

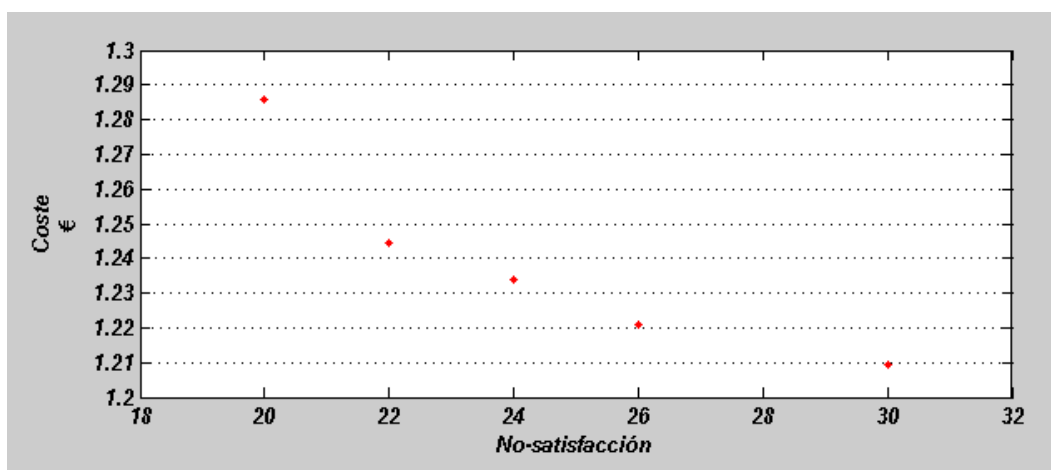


Fig. 3. Soluciones dentro de unos límites impuestos por el usuario para el caso 1.

El usuario tendría que decidir qué solución le parece más adecuada entre las cinco que se encuentran dentro de los límites que ha considerado razonables.

4.2 Caso residencial 2

Para el siguiente caso se añade un consumo más, el vehículo eléctrico. Suponiendo una carga monofásica convencional, este tipo de consumos emplean el voltaje e intensidad eléctrica del mismo nivel que la propia vivienda, es decir, 16 amperios y 230 voltios. Esto implica que la potencia eléctrica de este tipo de cargas es de 3.7 kW.

Como vemos la potencia consumida para cargar el vehículo eléctrico es la mayor de todas las que se han considerado, por lo que es un consumo relevante. Con este nivel de potencia, el proceso de carga de la batería tarda unas 8 horas. Esta solución es óptima, fundamentalmente para recargar el vehículo eléctrico durante la noche en un garaje de vivienda unifamiliar o garaje comunitario.

El resto de los consumos se mantienen como en el caso 1, y el precio de la electricidad sigue siendo el mismo (1 de abril de 2014, tarifa nocturna).

Dispositivos	Potencia (kW)	Duración (h)	Hora de mínima de comienzo	Hora máxima de comienzo
Cocina1	2.5	2	≥ 8	≤ 15
Lavavajillas1	0.5	1	\geq Cocina1 + 2 h	≤ 23
Cocina2	2.5	2	\geq Cocina1 + 2h	≤ 22
Lavavajillas2	0.5	1	\geq Lavavajillas1 + 1 h \geq Cocina2 + 2 h	≤ 24
Lavadora	0.5	1	-	≤ 22.75
Secadora	2	0.25	\geq Lavadora + 1 h	≤ 23.75
Plancha	1	0.5	\geq Secadora + 0.25 h	≤ 24
Vehículo eléctrico	3.7	8	≥ 15	≤ 24

Tabla 4. Consumos del caso 2.

Al tener un nuevo consumo, el vehículo eléctrico, la programación de las aplicaciones por el usuario podría ser la siguiente:

Programación usuario	Hora de comienzo	Hora de fin
Cocina1	12:00	14:00
Lavavajillas1	15:00	16:00
Cocina1	18:30	20:30
Lavavajillas2	22:00	23:00
Lavadora	17:00	18:00
Secadora	18:00	18:15
Plancha	18:30	19:00
Vehículo eléctrico	24:00	8:00

Tabla 5. Programación deseada por el usuario en el caso 2.

Una vez, restringidos los consumos y conocida su duración y potencia nominal podemos calcular, utilizando los precios horarios de la electricidad, el coste de la factura para ese día. Haciendo cálculos, el coste con mayor satisfacción para el usuario es:

Coste con la programación del usuario = 2.177 €/día.

Como en el caso anterior, hay que añadirle el coste fijo correspondiente a la potencia contratada. Podemos observar que el periodo de tiempo con más consumo de potencia es la madrugada debido a la carga del vehículo eléctrico. La potencia necesaria será de 3.7 kW, por lo que la potencia a contratar será de 4.6 kW. El coste total de la factura eléctrica por día será:

Coste total = 2.177€/día + 4.6 kW*0.105€/kW = 2.66 €/día.

Empleamos ahora el algoritmo NSGA-II con 100 iteraciones y una población inicial de 40 individuos. En la Fig. 4 se muestra la población inicial.

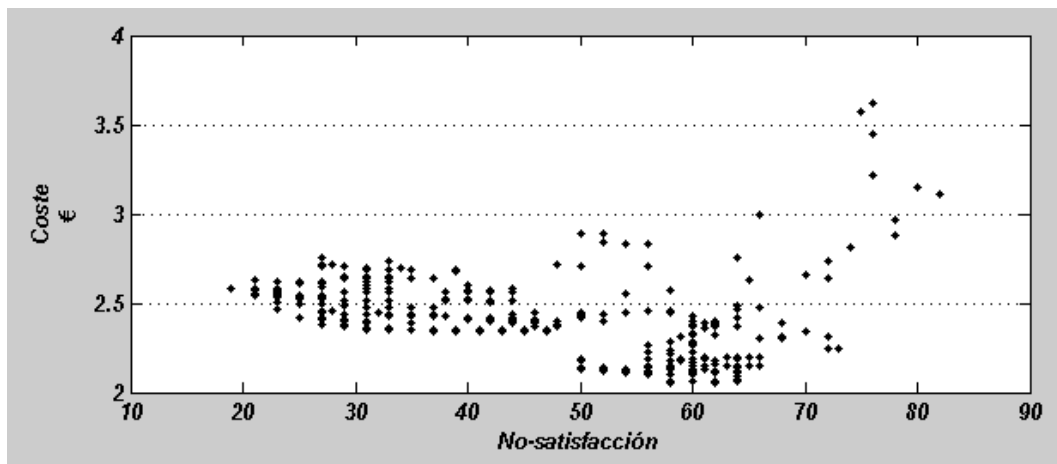


Fig. 4. Población inicial obtenida con el algoritmo NSGA-II para el caso 2.

Y una vez iterado, los puntos óptimos para este ejemplo son:

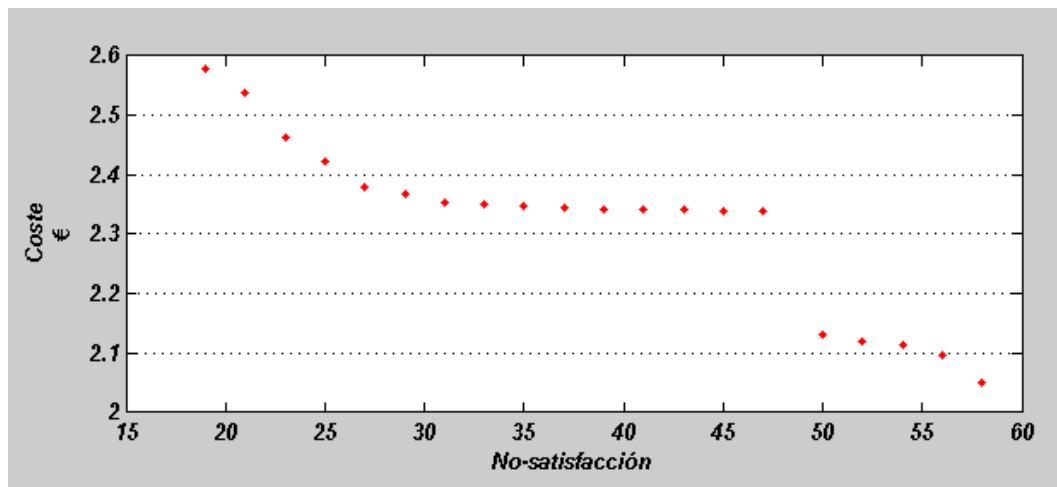


Fig. 5. Soluciones obtenidas con el algoritmo NSGA-II para el caso 2.

Como en el ejemplo anterior, hay un salto de 20 céntimos en la parte derecha de la imagen, en el que la no satisfacción prácticamente no varía. Así que, en caso de indecisión sería recomendable la opción más barata porque con un aumento pequeño de la no-satisfacción se consigue una reducción importante del coste diario.

Además también hay una parte plana, que va desde un valor 30 hasta 47 de la no-satisfacción. Esto es, para costes similares tenemos gran variación del otro objetivo, y por tanto, sería aconsejable elegir los puntos situados a la izquierda de esa parte del gráfico.

Los valores numéricos de las variables de decisión (electrodomésticos), como en el caso anterior, están colocados en el [apéndice 4.2](#). Eligiendo nuevamente tres de los puntos más relevantes, por ejemplo, el de menor coste, el que genera mayor satisfacción en el usuario y un punto central podemos comparar los valores con la propuesta realizada por el usuario y tener valores numéricos con los que tomar una decisión.

	Coste en euros	Índice de no-satisfacción	Ahorro (%)
Solución 1	2.069	58	22.86
Solución 2	2.348	35	11.73
Solución 3	2.579	19	3.05

Tabla 6. Comparación de los objetivos de tres soluciones del caso 2.

Como podemos comprobar, es posible ahorrar más de un 20% en la factura anteponiendo el coste a la satisfacción del usuario.

Si se fijan unos límites razonables a las funciones objetivos se pueden estudiar las soluciones que se encuentren dentro de esos límites y seleccionar la que se considere como más adecuada (según el criterio del usuario).

Si fijamos unos límites de 2.3 y 2.5 €, y de 24 y 30, obtenemos tres posibles puntos entre los que elegir (Fig. 6). De esta forma acotamos las posibilidades de elección y obtenemos soluciones con un nivel medio de optimización para ambos objetivos. En el apéndice 4.2 se muestra que obtenemos un ahorro de, aproximadamente, un 10 %.

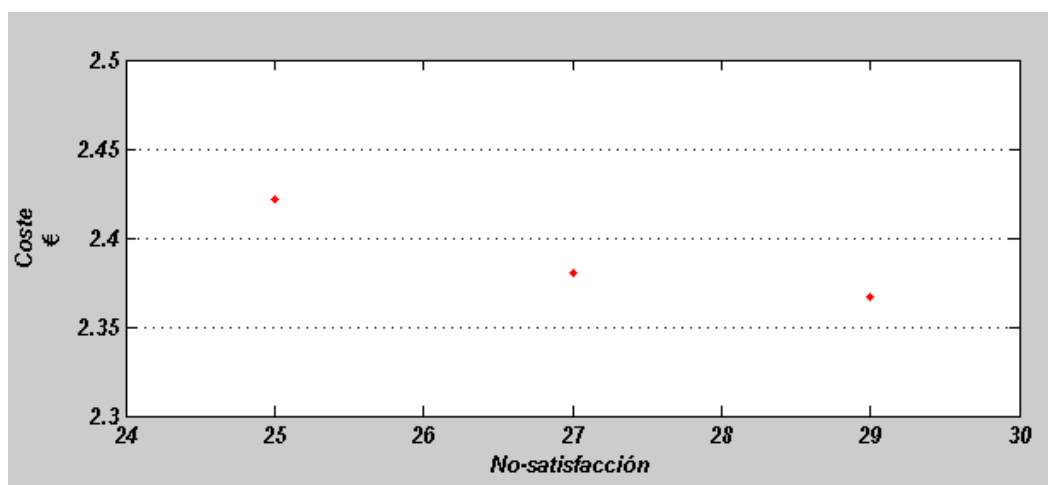


Fig. 6. Soluciones dentro de unos límites impuestos por el usuario para el caso 2.

4.3 Caso residencial 3

Para la realización del tercer caso se han utilizado datos correspondientes al 1 de julio de 2014 (un día de verano). Se ha añadido un consumo más, el aire acondicionado.

Los aparatos de aire acondicionado hoy en día sirven tanto para refrigerar como para calentar los espacios necesarios. Ahora bien, si nos centramos en consumo domésticos, y con la necesidad de aclimatar una superficie de unos 20 m² como puede ser un salón o un dormitorio, la potencia nominal suele ser de unos 2.5 kW.

Como podemos observar, la potencia consumida por el aparato de aire acondicionado es una de las mayores de todas. Por lo tanto es un consumo relevante.

El resto de los consumos se mantienen como en el caso 2. En la Tabla 7 se muestra la programación inicialmente establecida por el usuario.

Dispositivos	Potencia (kW)	Duración (h)	Hora de mínima de comienzo	Hora máxima de comienzo
Cocina1	2.5	2	≥ 8	≤ 15
Lavavajillas1	0.5	1	$\geq \text{Cocina1} + 2 \text{ h}$	≤ 23
Cocina2	2.5	2	$\geq \text{Cocina1} + 2 \text{ h}$	≤ 22
Lavavajillas2	0.5	1	$\geq \text{Lavavajillas1} + 1 \text{ h}$ $\geq \text{Cocina2} + 2 \text{ h}$	≤ 24
Lavadora	0.5	1	-	≤ 22.75
Secadora	2	0.25	$\geq \text{Lavadora} + 1 \text{ h}$	≤ 23.75
Plancha	1	0.5	$\geq \text{Secadora} + 0.25 \text{ h}$	≤ 24
Vehículo eléctrico	3.7	8	≥ 15	≤ 24
Aire acondicionado	2.5	3	-	≤ 24

Tabla 7. Consumos del caso 3.

Al tener un nuevo consumo la programación de las aplicaciones por el usuario se ha modificado (Tabla 8).

Programación usuario	Hora de comienzo	Hora de fin
Cocina1	12:00	14:00
Lavavajillas1	15:00	16:00
Cocina2	18:30	20:30
Lavavajillas2	22:00	23:00
Lavadora	17:00	18:00
Secadora	18:00	18:15
Plancha	18:30	19:00
Vehículo eléctrico	24:00	8:00
Aire acondicionado	15:00	18:00

Tabla 8. Programación deseada por el usuario en el caso 3.

Una vez, restringidos los consumos y conocida su duración y potencia nominal podemos calcular el coste de la factura para ese día. Haciendo cálculos, el coste con mayor satisfacción para el usuario da:

Coste con la programación del usuario = 5.56 €/día.

Como en los casos anteriores hay que añadirle el coste fijo correspondiente a la potencia contratada. Como podemos observar el periodo de tiempo con más consumo de potencia se encuentra entre las 12 y las 14 horas, ya que es cuando el primer uso de la cocina y del aparato de aire acondicionado coinciden. La potencia necesaria será de 5 kW. por lo que la potencia a contratar será de 5.75 kW. El coste total de la factura eléctrica por día será:

Coste total = 5.56 €/día + 5.75 kW*0.105€/kW = 6.164 €/día.

Con el algoritmo NSGA-II, con 100 iteraciones y una población inicial de 40 individuos, representadas en la Fig. 7, se obtienen las soluciones (frente de Pareto) que se muestran en la Fig. 8.

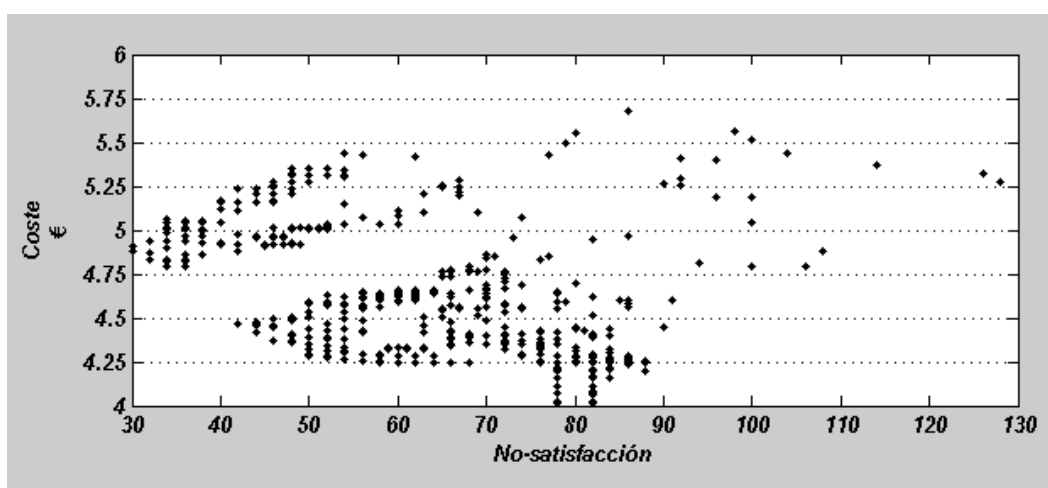


Fig. 7. Población inicial obtenida con el algoritmo NSGA-II para el caso 3.

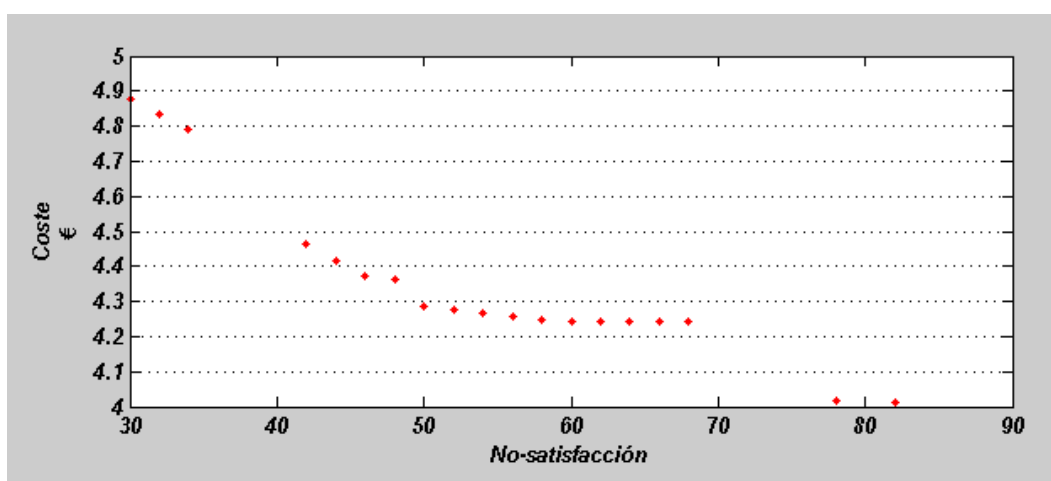


Fig. 8. Soluciones obtenidas con el algoritmo NSGA-II para el caso 3.

En la Fig. 8 se pueden observar tres zonas claramente diferenciadas. Eligiendo tres soluciones: la de menor coste, la que genera mayor satisfacción en el usuario y una de la zona central, podemos compararlas con la propuesta realizada por el usuario (Tabla. Los valores numéricos de las variables de decisión están disponibles en el [apéndice 4.3.](#))

	Coste en euros	Índice de no satisfacción	Ahorro (%)
Punto 1	4.012	82	34.91
Punto 2	4.287	50	30.45
Punto 3	4.875	30	20.91

Tabla 9. Comparación de los objetivos de tres soluciones del caso 3.

Como podemos comprobar, a costa de perder satisfacción por parte del usuario, podemos ahorrar casi un 35% en la factura.

El usuario podría determinar unos límites razonables para los dos objetivos, estudiar las soluciones que se encuentren entre esos límites y seleccionar la que le parezca más adecuada (Fig. 9).

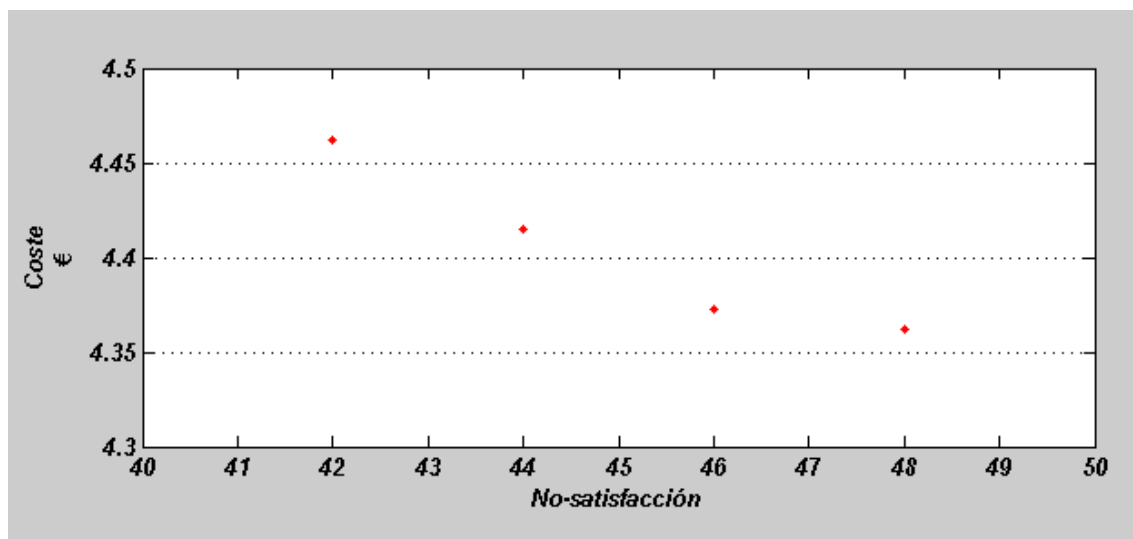


Fig. 9. Soluciones dentro de unos límites impuestos por el usuario para el caso 3.

Si observan los valores de ahorro de las soluciones que se muestran en la Fig. 9 (ver [apéndice 4.3](#)) éste se sitúa en torno al 29%, que es ya un valor considerable y una solución aceptable para el usuario teniendo en cuenta ambos objetivos.

5. CONCLUSIONES

A partir de los casos de estudio puede extraerse una serie de conclusiones sobre la influencia de los distintos tipos de carga en “Smarts grid” y sobre el ahorro proporcionado a la factura eléctrica. Los más importantes se citan a continuación.

- Como se ha podido observar en los resultados obtenidos, se puede obtener un ahorro considerable en la factura de la luz. Eso sí, dicho ahorro es posible porque se han programado las aplicaciones en horas valle donde el precio de la electricidad es más barata. Estas soluciones de coste mínimo serían adecuadas por ejemplo para electrodomésticos programables que no interrumpieran las horas de sueño.
- La discretización de cada hora en periodos de 15 minutos se considera adecuada. Está claro que incurrimos en un error pero estudiando los casos resueltos se puede concluir que se han conseguido cambios mínimos en el coste y la no satisfacción, es decir, se ha cubierto un amplio abanico de posibilidades y se ha dotado al usuario de la información necesaria para la toma de decisión.

Ahora es momento de comentar posibles mejoras que puedan implementarse en el contexto del presente proyecto y dé una solución más exacta. Las dos posibles mejoras más relevantes son:

- Reducir el periodo de discretización, de esta forma se pueden generar soluciones con un mínimo de variación y que se adecuen mejor a las necesidades del usuario.
- Añadir consumos adicionales. Se han obviado los electrodomésticos menos relevantes como el ordenador, microondas, video, etc. porque su consumo era inferior a las estudiadas. Añadiendo todas estas aplicaciones extras se aproximaría mejor a lo que es una vivienda tradicional y se podrían conseguir resultados más exactos y más reales.
- Añadir perfiles de carga. Se ha realizado una aproximación importante en el consumo de los electrodomésticos y es que se ha tomado consumo constante en el tiempo. Esto podría incurrir a error y una forma de eliminarlo sería conocer los perfiles de carga de los diferentes consumos. De esta forma, si estadísticamente o mediante alguna fórmula heurística conseguimos periodificar las aplicaciones con su correspondiente consumo mejoraremos los resultados.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Bernal-Agustín JL, Cortés-Arcos T., Dufo-López R., Lujano-Rojas JM, Monteiro C.** *Modeling the Multiobjective Optimization of Electricity Consumption for Residential Consumers.* Advanced Materials Research 2013;748:493-497. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.748.493.
- [2] **Lujano-Rojas JM, Monteiro C, Dufo-López R, Bernal-Agustín JL.** *Optimum residential load management strategy for real time pricing (RTP) demand response programs.* Energy Policy 2012;45:671–9. doi:10.1016/j.enpol.2012.03.019.
- [3] **Deb K, Pratap A, Agarwal S, Meyarivan T.** *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II.* IEEE Trans Evol Comput 2002;6:182–97. doi:10.1109/4235.996017.
- [4] **Coello Coello, C.A., Lamont, G.B., & Van Veldhuisen, D.A.** *Evolutionary algorithms for solving multiobjective problems.* Springer, 2007, pp. 800.
- [5] *BOE. Real Decreto 216/2014 por el que se establece la metodología de cálculo de los precios voluntarios para el pequeño consumidor de energía eléctrica y su régimen jurídico de contratación.* Ministerio de Industrio, Energía y Turismo. Marzo de 2014.
- [6] *BOE. Orden IET/107/2014, por la que se revisan los peajes de acceso de energía eléctrica para 2014.* Ministerio de Industrio, Energía y Turismo. Enero de 2014.
- [7] *Precio voluntario para el pequeño consumidor.* Red Eléctrica España. <http://www.esios.ree.es/web-publica/pvpc/>.
- [8] *Matlab documentation.* <http://es.mathworks.com/help/>.

APÉNDICES

Los apéndices incluyen una descripción de la nueva metodología de cálculo de precios, de las herramientas utilizadas para la realización el proyecto y además se añade un apéndice con la solución integra de los diferentes casos de estudio.

A.1 PRECIOS VOLUNTARIOS

El mecanismo establecido en el presente real decreto supone un cambio de modelo, el PVPC viene a sustituir a las tarifas de último recurso existentes pasando de un modelo en el que el precio del coste estimado de la energía se fijaba a priori a través de un mecanismo con un precio de futuro como era el caso de las subastas CESUR, a un mecanismo en el que el consumidor abonará el coste que ha tenido en el mercado la energía consumida en el periodo. El nuevo mecanismo propuesto supondrá un ahorro para los consumidores que, con carácter general, no tendrán que hacer frente al pago del coste de aseguramiento en el precio de un producto negociado en un mercado de futuros. A cambio, percibirán las variaciones de precio resultantes del distinto precio de la energía en cada momento.

Este nuevo mecanismo permitirá, por tanto, lograr una mayor transparencia en la fijación del precio, eliminar la participación del Gobierno, que convocaba las subastas CESUR, así como reducir los precios para el consumidor al disminuir el coste del aseguramiento, y en definitiva, dar una mayor señal de precio, lo que fomentará comportamientos de consumo más eficientes. Teniendo en cuenta lo anterior, y dentro de las revisiones normativas necesarias, el objeto del presente real decreto es establecer la metodología para el cálculo de los precios voluntarios para el pequeño consumidor.

Aquí, se va a comentar la estructura de los precios voluntarios para el pequeño consumidor, antes tarifas de último recurso, que serán de aplicación a los consumidores de baja tensión con potencia contratada hasta 10 kW.

- *Definición y estructura de los precios voluntarios para el pequeño consumidor*

Para el cálculo de los precios voluntarios se incluirá de forma aditiva en su estructura el coste de producción de energía eléctrica, además de los peajes de acceso, cargos y los costes de comercialización que correspondan. Además se establece que la determinación del coste de producción de energía eléctrica se realizará con base en el precio horario del mercado diario durante el período al que corresponda la facturación.

La facturación se efectuará por el comercializador de referencia que corresponda con base en lecturas reales y considerando los perfiles de consumo salvo para aquellos suministros que cuenten con equipos de medida con capacidad para telemedida y telegestión, y efectivamente integrados en los correspondientes sistemas, en los que la facturación se realizará considerando los valores horarios de consumo.

1. Los precios voluntarios para el pequeño consumidor serán los precios máximos que podrán cobrar los comercializadores de referencia a los consumidores que se acojan a dicho precio.

2. Los precios voluntarios para el pequeño consumidor serán los resultantes de aplicar la metodología de cálculo prevista en el presente real decreto y se fijarán considerando la estructura de peajes de acceso y cargos en vigor en cada momento.

3. Podrán acogerse a los precios voluntarios para el pequeño consumidor los titulares de los puntos de suministro efectuados a tensiones no superiores a 1 kV y con potencia contratada menor o igual a 10 kW.

4. Se entenderá que un consumidor se acoge al PVPC cuando, cumpliendo los requisitos para poder acogerse a dicho precio, sea suministrado y haya formalizado el correspondiente contrato de suministro con un comercializador de referencia y no se haya acogido expresamente a otra modalidad de contratación.

5. Salvo manifestación expresa en contrario por parte del consumidor, la modalidad de contratación con el comercializador de referencia será a PVPC.

6. Los precios voluntarios para el pequeño consumidor no incluirán ningún otro producto o servicio, sea energético o no, ofrecido directamente por el comercializador de referencia o por terceros

7. Sobre los precios voluntarios para el pequeño consumidor para cada categoría de consumo se aplicarán los correspondientes impuestos.

8. La duración de los contratos de suministro a PVPC será anual y se prorrogará automáticamente por plazos iguales. A estos efectos el comercializador de referencia deberá remitir al consumidor una comunicación, por escrito o cualquier medio en soporte duradero, con una antelación mínima de dos meses donde conste la fecha de finalización del contrato

9. El plazo máximo para el cambio de comercializador de los consumidores con derecho a quedar acogidos al PVPC será de 21 días, contados desde la recepción de la solicitud de cambio por el distribuidor, y sin perjuicio de que el plazo máximo de cierre de las liquidaciones con el comercializador saliente será de 42 días, contados a partir de la fecha en que se produzca el cambio de comercializador.

10. Para el cierre de la facturación, la estimación de medida cuando el cambio de comercializador o de modalidad de contratación se produzca fuera de ciclo de lectura, se realizará conforme al método de estimación de medidas vigente para el cambio de comercializador.

- *Cálculo de los precios voluntarios para el pequeño consumidor.*

1. Los precios voluntarios para el pequeño consumidor se calcularán incluyendo de forma aditiva los siguientes conceptos:

a) El coste de producción de energía eléctrica, que se determinará con base en el precio horario de los mercados diario e intradiario durante el período al que corresponda la facturación, los costes de los servicios de ajuste del sistema y, en su caso, otros costes asociados al suministro conforme se establece en el presente real decreto.

La facturación se efectuará por el comercializador de referencia con capacidad para telemedida y telegestión, y efectivamente integrados en los correspondientes sistemas y se realizará considerando los valores horarios de consumo puestos a disposición o en su caso remitidos por el encargado de la lectura. No obstante lo anterior, cuando el suministro no disponga de equipo de medida, la facturación se realizará aplicando a las lecturas reales por periodos puestas a disposición de los

b) Los peajes de acceso y cargos que correspondan.

c) Los costes de comercialización que se determinan en este real decreto.

2. Con carácter general, la revisión de los componentes del coste de producción de energía eléctrica de los precios voluntarios para el pequeño consumidor a los que se refiere el apartado 2, que en su caso procedan, se realizará de acuerdo con lo previsto en el presente real decreto, sin perjuicio de las revisiones de los peajes de acceso, cargos y otros costes regulados.

3. La periodicidad de la lectura y la facturación así como la forma de proceder en aquellos supuestos en los que no se disponga de lectura real, se realizará de acuerdo a lo dispuesto en el Real Decreto 1718/2012, de 28 de diciembre, por el que se determina el procedimiento para realizar la lectura y facturación de los suministros de energía en baja tensión con potencia contratada no superior a 15 kW.

- *Estructura general de los precios voluntarios para el pequeño consumidor.*

1. Los precios voluntarios para el pequeño consumidor se determinarán a partir del peaje de acceso asociado a cada punto de suministro y estarán compuestos por un término de potencia, un término de energía del peaje de acceso, un término correspondiente al coste horario de la energía y, en su caso, un término de la energía reactiva.

2. El término de potencia del PVPC, TPU, expresado en euros/kW y año, será el término de potencia del peaje de acceso y cargos más el margen de comercialización, calculado de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$TPU = TPA + MCF$$

Donde:

TPU: Término de potencia del PVPC.

TPA: Término de potencia del peaje de acceso y cargos de aplicación al suministro, expresado en euros/kW y año.

MCF: Margen de comercialización, expresado en euros/kW.

3. El término de energía del PVPC en el periodo tarifario p, TEUp, expresado en euros/kWh, será igual al término de energía del correspondiente peaje de acceso y cargos, calculados de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$TEUp = TEAp$$

Siendo:

p: Subíndice que identifica cada periodo tarifario del peaje de acceso.

TEUp: Término de energía del PVPC en el periodo tarifario p, según corresponda.

TEAp: Término de energía del peaje de acceso y cargos en el periodo tarifario p, según corresponda, de aplicación al suministro, expresado en euros/kWh.

4. El término de coste horario de energía del PVPC, TCUh, será igual a la suma del término de coste de producción, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$TCUh = (1 + PERDh) \times CPh$$

TCUh: Término de coste horario de energía del PVPC en cada hora, expresado en euros/kWh.

CPh: Coste de producción de la energía suministrada en cada hora expresado en euros/kWh.

PERDh: Coeficiente de pérdidas del peaje de acceso de aplicación al suministro en la hora h.

5. En su caso, el término de energía reactiva, expresado en euros/kVArh, que se determinará de acuerdo a las condiciones que se establecen para la aplicación de este término en el Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre, por el que se establecen tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

- *Determinación de los componentes de la facturación de los precios voluntarios para el pequeño consumidor.*

La facturación del PVPC estará compuesta por la suma de los términos de facturación de potencia, de facturación de energía activa y en su caso de facturación de energía reactiva, que se calcularán de acuerdo con lo indicado en los apartados siguientes:

1. Término de facturación de Potencia (FPU): El término de facturación anual de potencia, expresado en euros, será el producto de la potencia a facturar, Pot expresado en kW, por el precio del término de potencia del PVPC consumidor, TPU, expresado en euros/kW y año, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$FPU = TPU \times Pot$$

La facturación de este término se realizará de forma proporcional al número de días del año incluidos en el período de facturación correspondiente. La potencia a facturar (Pot) será la potencia contratada, en aquellos casos que se limite la potencia utilizada este término incluirá la máxima potencia a demandar. En los casos previstos en los que el control de la potencia se realice con un máxímetro la potencia a facturar se calculará según lo siguiente:

- a) Si la potencia máxima demandada registrada estuviere dentro del 85 al 105 por ciento respecto a la contratada dicha potencia contratada será la potencia a facturar (Pot).
 - b) Si la potencia máxima demandada registrada fuere superior al 105 por ciento de la potencia contratada, la potencia a facturar (Pot) será igual al valor registrado más el doble de la diferencia entre el valor registrado y el valor correspondiente al 105 por ciento de la potencia contratada.
 - c) Si la potencia máxima demandada registrada fuere inferior al 85 por ciento de la potencia contratada, la potencia a facturar (Pot) será igual al 85 por ciento de la citada potencia contratada.
2. Término de facturación de energía activa (FEU): El término de facturación de energía activa para el periodo de facturación correspondiente, expresado en euros, será el sumatorio resultante de multiplicar la energía consumida durante el periodo de facturación en cada periodo tarifario, por el precio del término de energía correspondiente de acuerdo con las fórmulas siguientes:

- a) En el caso de que se disponga de equipos de telemedida y telegestión:

$$FEU = \sum_{p \in \text{periodo facturación}} [(E_p * TEUp) + \sum_{h \in p} (E_{ph} * TCUh)]$$

E_p = Energía consumida en el periodo tarifario p expresada en kWh.

E_{ph} = Energía consumida en la hora h del periodo tarifario p, expresada en kWh.

$TEUp$ = Precio del término de energía del PVPC del periodo tarifario p, expresado en euros/kWh

$TCUh$ = Precio del término del coste horario de energía del PVPC, en cada hora h, calculado de acuerdo con el presente título, expresado en euros/kWh.

- b) En el caso de que se no disponga de equipos de telemedida y telegestión:

$$FEU = \sum_{p \in \text{periodo facturación}} E_p * [TEU_p + \frac{\sum_{h \in p} (TCU_h * ch)}{\sum_{h \in p} ch}]$$

E_p = Energía consumida en el periodo tarifario p expresada en kWh.

TEU_p = Precio del término de energía del PVPC del periodo tarifario p , expresado en euros/kWh

TCU_h = Precio del término del coste horario de energía del PVPC, en cada hora h , calculado de acuerdo con el presente título, expresado en euros/kWh.

Ch = coeficiente horario del perfil de consumo de la hora h . Estos coeficientes horarios del perfil de consumo ajustado serán calculados por Red Eléctrica de España S.A., como operador del sistema.

3. Término de facturación de energía reactiva: Las condiciones que se establecen para la aplicación del término de facturación de energía reactiva, expresado en euros, serán las fijadas para el peaje 2.0. A en el Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre, por el que se establecen los peajes de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

A.2 ALGORITMOS EVOLUTIVOS

A.2.1 Fundamentos

Para la realización del proyecto se ha utilizado la herramienta NSGA-II basada en algoritmos genéticos. La idea de estos algoritmos es la siguiente:

1. Definen una memoria que contienen las soluciones actuales.
2. Definen un módulo de selección que determinan cuales de las soluciones deben ser guardadas en la memoria y cuáles deben ser desechadas. Hay dos tipos de selección disponibles:
 - *Mating selection*, en la cual se escogen trazas prometedoras de las soluciones para posteriormente variarlas y conseguir soluciones óptimas.
 - *Enviromental selection*, determina cuál de las soluciones almacenas, es decir, se mantienen guardadas en la memoria.
3. Definen un módulo de variación que toma un conjunto de soluciones y sistemáticamente o aleatoriamente las modifica para generar potenciales mejores soluciones utilizando operadores específicos tales como:
 - *Crossover*, que produce nuevos individuos combinando la información de dos o más padres.
 - *Mutation*, donde se alteran los individuos o soluciones con más baja probabilidad de supervivencia.

Cuando consideramos un algoritmo evolutivo como analogía a la evolución natural, a las posibles soluciones, se las llama candidatos y al conjunto de soluciones o candidatos se le llama población. Y la *fitness function*, que es una función o funciones objetivo particular que caracteriza el problema de medida como lo cerca que esta la solución de conseguir el objetivo y de tener en cuenta las restricciones.

A.2. 2 Algoritmo NSGA-II

NSGA es un popular algoritmo genético basado en la no dominación para la optimización multiobjetivo. Como ya se ha comentado anteriormente es un algoritmo genético utilizado para resolver problemas de optimización no convexos y no uniformes ya sean simple o multiobjetivo. Es un algoritmo genético realmente efectivo aunque generalmente criticado por su complejidad computacional, falta de elitismo y por la necesidad de elegir un valor óptimo de parámetros a priori. Una versión modificada, NSGA-II, fue desarrollada, el cual tiene un mejor algoritmo de ordenación, incorpora elitismo y no es necesario escoger valores óptimos al inicio.

La población se inicializa como de costumbre y una vez que la población ya está inicializada se ordena en base a la no dominación en cada frontera. La primera frontera siendo un conjunto de soluciones completamente no dominadas en la población actual y la segunda frontera siendo dominado solamente por individuos de la primera frontera y así va avanzando la frontera. Cabe destacar que un individuo se dice que está dominado cuando la función objetivo es peor que el de otro individuo diferente. A cada individuo de cada frontera se le asigna un valor o rango que indica la frontera a la que pertenecen. Los individuos de la primera frontera poseerán un rango de valor 1, los de la segunda tendrán de rango 2 y así sucesivamente.

Además del rango, se calcula un nuevo parámetro llamado “*crowding distance*”. Este parámetro es una medida de como de cerca se encuentra un individuo de sus vecinos. Cuanto mayor sea este, mayor será la distancia entre individuos lo que resultara en una mayor diversidad de población.

Los padres son elegidos de la población inicial con ayuda de los dos parámetros descritos anteriormente. Un individuo será elegido si el rango es menor que el de otro o si “*crowding distance*” es mayor que otro. Los individuos seleccionados generaran hijos con ayuda de los operadores mutación y entrecruzamiento lo cual se discutirá más adelante.

La población actual, tanto hijos como padres, se vuelve a ordenar basándose en la no dominación y solo los N mejores individuos serán los seleccionados, siendo N el tamaño de la población. La selección se basa en el rango y “*crowding distance*” de la última frontera. El parámetro “*crowding distance*” solo se tendrá en cuenta cuando dos individuos posean el mismo rango.

Iniciando la población. La población es inicializada basándose en la dimensión del problema y restricciones si las hubiera.

Ordenación en base a la no dominación. La población actual se ordena con base a la no dominación. El algoritmo utilizado es el descrito a continuación.

- Para cada individuo p de la población P hacer lo siguiente:
 - Inicializar $S_p = \emptyset$. Este parámetro contendrá todos los individuos dominados por p .
 - Inicializar $n_p = 0$. Indicaré el número de individuos que dominan a p .
 - Para cada individuo q en P :
 - Si p domina a q entonces
 - Añadir q al conjunto S_p .
 - Si no, si q domina a p entonces

- Incrementar el contador de dominación una unidad $n_p = n_p + 1$.
 - Si $n_p = 0$ indica que no hay individuos que dominan a p entonces p pertenece a la primera frontera; Hay que asignar el valor de rango 1 a p .
- Esto se realiza para todos y cada uno de los individuos de la población P .
- Inicializar el contador de la frontera a uno; $i = 1$.
- Los siguiente es ejecutado mientras la frontera i -ésima es no nula:
 - $Q = \emptyset$. El conjunto para almacenar los individuos de la frontera $(i+1)$.
 - Para cada individuo en la frontera i
 - Para cada individuo q en S_p
 - $n_q = n_q - 1$, decrecemos el contador de dominación del individuo q .
 - si $n_q = 0$ entonces ningún individuo de la subsecuente frontera dominara a q . Así que el rango de q será $i + 1$. Actualizar el conjunto Q con el individuo q .
 - Incrementar el contador de la frontera en una unidad.
 - Ahora el conjunto Q será la siguiente frontera.

Este algoritmo es mejor que el original de NSGA ya que utiliza información del conjunto de individuos que un individuo domina (S_p) y el número de individuos que dominan al individuo (n_p).

Crowding distance. Una vez se ha completado la ordenación de los individuos se le asigna este parámetro a cada uno. Desde que son seleccionados basándose en el rango, a todos los individuos en la población se le asignan un valor de “crowding distance”. Este valor se asigna teniendo en cuenta la frontera a la que pertenecen los individuos y comparando la distancia entre dos de ellos en diferente frontera aunque en menor cantidad. Este parámetro se calcula de la siguiente manera:

- Para cada frontera F_i , n es el número de individuos.
 - Inicializar la distancia a cero para todos los individuos, $F_i(d_j) = 0$.
 - Para cada función objetivo
 - Ordenar los individuos basándose en el objetivo.
 - Asignar el valor infinito a la distancia en los valores máximo y mínimo permitidos para los individuos.
 - Para $k=2$ hasta $n - 1$

$$I(d_k) = I(d_k) + \frac{I(k+1).m - I(k-1).m}{f_m^{max} - f_m^{min}}$$

- $I(k).m$ es el valor del objetivo número m del individuo k -ésimo

La idea detrás de este parámetro es encontrar la distancia euclídea entre cada individuo perteneciente a una frontera basándose en sus objetivos. Los individuos de la frontera son siempre seleccionados ya que poseen un valor infinito para este parámetro.

Selección de los individuos. Una vez que los individuos están ordenados según la no dominación y con el parámetro anterior asignado, la selección se lleva a cabo usando un nuevo parámetro llamado crowded-comparison-operator. Dicha comparación se lleva a cabo como se muestra a continuación.

- (1) el rango de no dominación
- (2) parámetro “crowding distance”
 - El individuo p se compara con q si:

- Rango de $p <$ rango de q
- O si los individuos p y q tienen el mismo rango el parámetro “crowding distance” de p es mayor que el de q .

Los individuos son seleccionados haciendo una selección binaria empleando el parámetro “crowded-comparison”

Operadores genéticos

- **Simulated Binary Crossover.** Este parámetro simula el entrecruzamiento observado en la naturaleza y se da como sigue:

$$c_{1,k} = \frac{1}{2}[(1 - \beta_k)p_{1,k} + (1 + \beta_k)p_{2,k}]$$

$$c_{2,k} = \frac{1}{2}[(1 + \beta_k)p_{1,k} + (1 - \beta_k)p_{2,k}]$$

donde, $c_{i,k}$ es el i -ésimo hijo con el k -ésimo componente, $p_{i,k}$ es el padre seleccionado y β_k (≥ 0) es un número generado aleatoriamente teniendo en cuenta la función de densidad:

$$p(\beta) = \frac{1}{2}(\eta_c + 1)\beta^{\eta_c}, \text{ if } 0 \leq \beta \leq 1$$

$$p(\beta) = \frac{1}{2}(\eta_c + 1)\frac{1}{\beta^{\eta_c+2}}, \text{ if } \beta > 1.$$

Esta distribución se puede obtener de un número aleatorio u uniformemente espaciado entre (0,1). η_c es el valor de entrecruzamiento en la distribución. Esto es

$$\beta(u) = (2u)^{\frac{1}{(\eta_c+1)}}$$

$$\beta(u) = \frac{1}{[2(1-u)]^{\frac{1}{(\eta_c+1)}}}$$

- **Polynomial Mutation**

$$c_k = p_k + (p_k^u - p_k^l)\delta_k$$

Donde c_k es el hijo y p_k es el padre con p_k^u siendo el límite superior en el padre y p_k^l el límite inferior y δ_k es una pequeña variación que se calcula de una distribución polinomial dada por:

$$\delta_k = \frac{1}{(2r_k)\eta_m + 1} - 1, \text{ if } r_k < 0.5$$

$$\delta_k = 1 - \frac{1}{[2(1 - r_k)]\eta_m + 1} \text{ if } r_k \geq 0.5$$

Donde r_k es un número aleatorio uniformemente muestreado entre (0,1) y η_m es el índice o coeficiente de mutación.

Recombinación y selección. La población de “hijos” se combina con la población actual y se realiza la selección para elegir los individuos de la siguiente generación. Añadiendo los mejores individuos tanto de poblaciones previas como las actuales se asegura el elitismo. La población vuelve a ser ordenada en base a la no dominación. La nueva generación se va llenando hasta que el tamaño de la población actual es igual al tamaño de la población anterior. Si por un casual, los individuos seleccionados exceden el límite de población, se eligen los individuos basándose en el parámetro “crowding distance” en orden descendiente. El proceso se repite para generar las subsecuentes generaciones.

Usando la función. Cuando ejecutas el código los argumentos necesarios para conseguir que funcione el programa son el número de generaciones y el tamaño de la población. Una vez introducidos, el usuario es preguntado por el número de objetivos y el número de variables de decisión. También es necesario introducir los valores límite para las variables de decisión. Una vez que todos los datos preliminares se han introducido, hay que modificar la función objetivo.

A.3 MATLAB

A.3.1 ¿Qué es MATLAB?

MATLAB es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación. Mediante MATLAB, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas incorporadas permiten explorar diversos enfoques y llegar a una solución antes que con hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como pueden ser C/C++ o Java.

MATLAB se puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones, tales como procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imagen y vídeo, sistemas de control, pruebas y medidas, finanzas computacionales y biología computacional. Más de un millón de ingenieros y científicos de la industria y la educación utilizan MATLAB, el lenguaje del cálculo técnico.

A.3.2 Representación gráfica de funciones

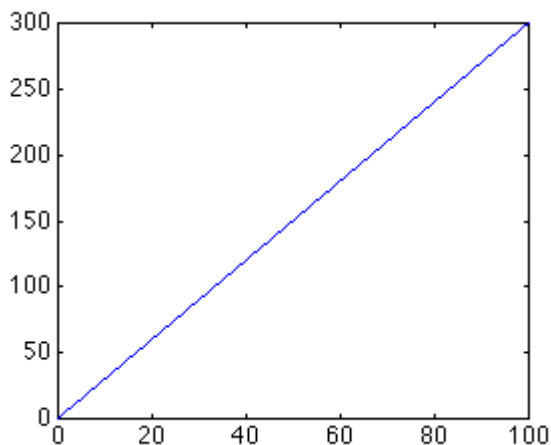
Una de las funciones más importantes en Matlab es la función *plot*. *Plot* también parece ser una de las más sencillas funciones para aprender a usar. La sintaxis básica de la función es escribir el siguiente comando en la ventana de comandos del Matlab o en un archivo-m.

- `plot (x,y)`

Este comando representará los elementos del vector *x* en el eje horizontal de una figura, y los elementos del vector *y* en el eje vertical de la figura. Por defecto, cada vez que se use el comando *plot*, se borrará la figura que estaba, quedando solo la nueva; discutiremos cómo forzar esto más abajo. Si quisiéramos graficar la sencilla fórmula lineal $y = 3x$, deberíamos escribir lo siguiente:

- `x = 0:0.1:100;`
- `y = 3*x;`
- `plot(x,y)`

lo que generará la figura siguiente:



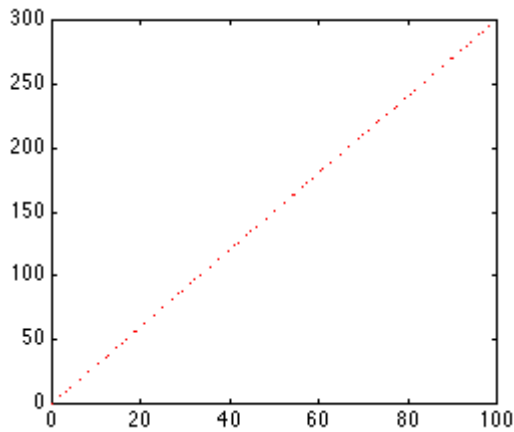
Una cosa a tener en cuenta cuando se usa el comando *plot* es que los vectores *x* e *y* deben ser la misma longitud. La otra dimensión puede variar. Matlab puede graficar un vector $1 \times n$ versus un vector $n \times 1$, o un vector $1 \times n$ versus una matriz $2 \times n$, (obtendrá dos líneas), el largo *n* es el mismo para ambos vectores.

El comando *plot* puede también usarse con solamente un vector como entrada o parámetro. En ese caso las columnas del vector se grafican versus sus índices (el vector $1:1:n$ se usará para el eje horizontal). Si el vector de entrada contiene números complejos, Matlab dibuja la parte real de cada elemento (en el eje *x*) versus la parte imaginaria (en el eje *y*).

En cuanto a la estética de los gráficos, el color y el marcador de un gráfico se pueden cambiar agregando un tercer parámetro (entre apóstrofo 'esto') al comando *plot*. Por ejemplo, para graficar la función de arriba con una línea punteada roja, debería cambiarse el archivo-m a:

- `x = 0:0.1:100;`
- `y = 3*x;`
- `plot (x,y,'r:')`

Ahora el gráfico se vería:



La tercera entrada contiene de uno a tres caracteres entre apostrofes y que especifican el color y tipo de marcador según la tabla dada a continuación:

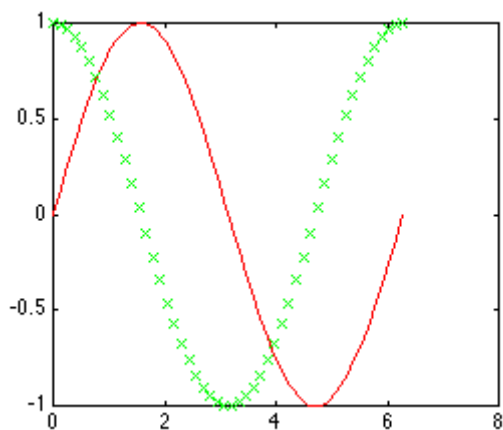
COLORES	
y	amarillo
v	violeta
c	celeste
r	rojo
g	verde
b	azul
w	blanco
k	negro

MARCADORES	
.	punto
o	circulo
x	cruz
+	suma
-	resta
*	estrella
:	punteado
-.	punto y raya
--	a trazos

Se puede representar más de una función en una misma figura. Digamos que quisiera representar la función seno y la función coseno en el mismo conjunto de ejes usando diferentes colores y marcadores para cada una. Puede usarse lo siguiente para lograrlo:

```
- x = linspace(0,2*pi*50);
- y = sen(x);
- z = cos(x);
- plot(x,y,'r',x,z,'gx')
```

Y obtendremos las funciones seno en rojo continuo y el coseno en verde con cruces.



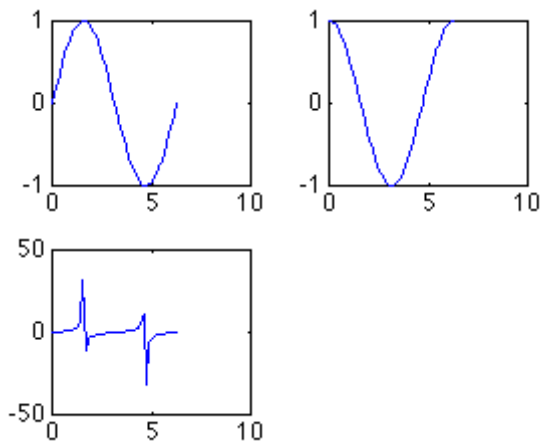
Puede conseguirse el mismo efecto utilizando los comandos *hold on* y *hold off*. Hay que indicar que una vez utilizado el comando *hold on* se utilizarán los mismos ejes para todas las figuras hasta que se emplee el comando *hold off*.

En una misma figura puede ponerse más de una línea empleando el comando *subplot*. El comando *subplot* le permite separar la gráfica en tantas figuras como se quiera, y ponerlas todas en una misma figura. Para usar este comando, copie la siguiente línea de código e insértela en la ventana de comandos de Matlab o en un archivo-m.

- `subplot(m,n,p)`

Este comando divide la figura en una matriz de m filas y n columnas, por lo tanto crea $m \times n$ gráficos. El p -ésimo gráfico es seleccionado como gráfico activo (solo hay uno a la vez por figura). Por ejemplo, suponga que quisiera ver una senoide, un coseno y una tangente dibujadas en la misma figura pero no en los mismos ejes. Debería escribir:

- `x = linspace(0,2*pi,50);`
- `y = sin(x);`
- `z = cos(x);`
- `w = tan(x);`
- `subplot(2,2,1)`
- `plot(x,y)`
- `subplot(2,2,2)`
- `plot(x,z)`
- `subplot(2,2,3)`
- `plot(x,w)`



Como puede ver, habrá solo tres gráficos, a pesar de haber creado una matriz de 2×2 , de 4 subplots. No tiene por qué rellenar todas las subfiguras que ha creado, pero Matlab dejará un lugar para cada figura en la matriz. Pudo haber hecho sencillamente otro gráfico mediante la línea `subplot(2,2,4)`. Las subplots se ordenan de la misma manera como se lee un libro. La primera subplot está arriba a la izquierda, la siguiente está a su derecha. Cuando todas las columnas de ese renglón están ocupadas, se rellena la columna de la izquierda del próximo renglón de abajo (asumiendo que genera los subplots en el orden 1, 2, 3,...).

Una cosa a notar acerca del comando *subplot* es que cada comando *plot* ejecutado después ubicará la figura en la última posición que se especificó en el último comando *subplot*, borrando la figura que había. Por ejemplo, en el archivo-m previo, si se emitiera un comando *plot* más tarde en el mismo, éste se graficaría en la en la tercera posición en la ventana gráfica, borrando la línea de la

tangente. Para resolver este problema, la figura debería ser borrada (usando *clf*), o debería especificarse una nueva figura (mediante el comando *figure*).

Ahora que ha encontrado diversas formas de representar funciones, puede personalizarlas para lograr lo que desea. El modo más frecuente de hacerlo es mediante el comando *axis*. El comando *axis* cambia los ejes de la gráfica actual, de modo que solo se muestra la parte del eje que desea. El comando *axis* se usa ingresando el siguiente comando justo después del comando *plot* (o cualquier comando que tiene un plot como una de sus salidas):

- *axis* ([xmin, xmax, ymin, ymax])
 - o Siendo:
 - *xmin*: el valor mínimo en el eje de las x.
 - *xmax*: el valor máximo en el eje de las x.
 - *ymin*: el valor mínimo en el eje de las y.
 - *ymax*: el valor máximo en el eje de las y.

Cuando se usa el comando *subplot*, pueden cambiarse los ejes de cada subplot emitiendo un comando *axis* antes del próximo *subplot*. Hay más usos del comando *axis* que puede ver si escribe *help axis* en la ventana de comandos de Matlab.

Otra cosa importante en los gráficos es la inserción de texto de modo que:

- *title*: se le da un título al gráfico.
- *xlabel*: incorpora una etiqueta en el eje x.
- *ylabel*: incorpora una etiqueta en el eje y.

Todos los comandos mencionados se escriben después de ejecutarse el plot actual.

Puede incorporarse texto de dos formas más al mismo gráfico: con el comando *text* y el comando *gtext*.

- *text(xcor,ycor,'textstring')*: requiere conocer las coordenadas donde ubicar la cadena de texto.
- *gtext('textstring')*: este comando no requiere conocer las coordenadas exactas, simplemente mueva el puntero al lugar deseado y haga clic.

Para finalizar le muestro otros comandos que pueden usarse con el comando *plot*:

- *clf*: borra el gráfico actual, lo deja en blanco.
- *figure*: abre una nueva ventana para graficar, y se mantiene la gráfica previa.
- *close*: cierra la ventana de la gráfica actual.
- *loglog*: igual que la función *plot*, salvo que los ejes se escalan en escala logarítmica.
- *semilogx*: igual que la función *plot*, excepto que el eje x está escalado en escala logarítmica.
- *semilogy*: igual que la función *plot*, excepto que el eje y está escalado en escala logarítmica.
- *grid*: añade una rejilla al gráfico.

A.3.3 Funciones utilizadas en MATLAB

- *nargin()*: devuelve el número de argumentos de entrada de una función.
- *error()*: saca por pantalla un mensaje de error y aborta la operación.
- *isnumeric()*: determina si la entrada es un array numérico.
- *round()*: redondea al número entero
- *clear*: elimina todas las variables y valores de la hoja de trabajo.
- *mod*: devuelve el resto de una división.
- *sprintf()*: transforma una cadena de caracteres en un array que luego sale por pantalla.
- *input()*: requiere una entrada por parte del usuario.
- *zeros()*: crea un array de todo ceros.
- *save*: guarda las variables en un archivo.
- *isempty()*: determina si un array está vacío.
- *rand()*: genera un número real aleatorio entre cero y uno,
- *size()*: devuelve las dimensiones de un array o matriz.
- *isequal()*: expresión booleana que devuelve un uno si los elementos comparados son iguales
- *sort()*: ordena los elementos de un array de forma ascendente o descendente.
- *max()*: devuelve el mayor elemento de un array
- *find()*: encuentra valores e índices en elementos no nulos.
- *length()*: devuelve el tamaño o número de elementos de un array.

A.4 CASOS RESUELTOS

Este apéndice incluye las soluciones en detalle de cada uno de los casos resueltos. La programación de todas las aplicaciones, el valor máximo de potencia necesaria para ese día y esa solución y el valor de cada uno de los dos objetivos a optimizar.

Además hace falta destacar que al dividir cada hora en periodos de 15 minutos, para calcular el inicio de cada aplicación en horas, hay que dividir por cuatro el valor temporal indicado en las tablas.

A.4.1 Caso residencial 1

	Soluciones								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cocina1	32	32	33	32	44	44	44	44	44
Lavavajillas1	48	48	48	60	63	63	60	60	60
Cocina2	44	44	43	44	68	69	68	71	72
Lavavajillas2	72	72	71	64	96	96	95	95	96
Lavadora	72	70	68	15	48	48	48	48	48
Secadora	93	93	93	19	95	95	95	95	95
Plancha	96	96	96	74	96	96	96	96	96
Potencia necesaria (W)	3000	3000	3000	2500	3000	3000	3000	3000	3000
Índice de no satisfacción	62	58	54	50	48	46	42	36	34
Coste (€)	0,936	0,937	0,948	0,959	1,175	1,177	1,177	1,183	1,185
Ahorro (%)	42,36	42,30	41,63	40,95	27,65	27,52	27,52	27,16	27,03

	Soluciones							
	10	11	12	13	14	15	7	8
Cocina1	44	44	44	44	45	46	47	48
Lavavajillas1	60	60	60	60	60	60	60	60
Cocina2	74	72	73	74	74	74	74	74
Lavavajillas2	95	88	88	88	88	88	88	88
Lavadora	48	48	47	48	48	48	48	48
Secadora	95	95	95	95	95	95	95	95
Plancha	96	96	96	96	96	96	96	96
Potencia necesaria (W)	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Índice de no satisfacción	30	26	24	22	20	18	16	14

Coste (€)	1,209	1,221	1,233	1,244	1,285	1,326	1,367	1,408
Ahorro (%)	25,55	24,82	24,08	23,40	20,87	18,35	15,83	13,30

A.4.2 Caso residencial 2

	Soluciones								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cocina1	32	32	34	33	33	44	44	44	44
Lavavajillas1	92	87	86	85	84	64	63	62	61
Cocina2	44	44	44	44	44	68	68	68	68
Lavavajillas2	96	91	90	89	88	72	72	72	72
Lavadora	16	17	17	17	17	17	17	17	17
Secadora	72	72	72	72	72	23	21	21	21
Plancha	74	74	74	74	74	93	93	93	93
Vehículo eléctrico	93	93	93	93	93	95	95	95	95
Potencia necesaria (W)	4200	4200	4200	3700	3700	3700	3700	3700	3700
Índice de no satisfacción	58	56	54	52	50	47	45	43	41
Coste (€)	2,052	2,097	2,113	2,12	2,13	2,339	2,34	2,34	2,341
Ahorro (%)	22,86	21,17	20,56	20,30	19,92	12,07	12,03	12,03	11,99

	Soluciones								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Cocina1	44	44	44	44	44	44	44	45	46
Lavavajillas1	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Cocina2	68	69	70	71	72	73	74	74	74
Lavavajillas2	72	73	74	75	76	77	78	78	78
Lavadora	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Secadora	22	21	21	22	21	22	21	21	21
Plancha	93	93	93	93	93	93	93	93	93
Vehículo eléctrico	95	95	95	95	95	95	95	95	95
Potencia necesaria (W)	3700	3700	3700	3700	3700	3700	3700	3700	3700
Índice de no satisfacción	39	37	35	33	31	29	27	25	23
Coste (€)	2,342	2,345	2,348	2,35	2,354	2,367	2,38	2,421	2,462
Ahorro (%)	11,95	11,84	11,73	11,65	11,50	11,02	10,53	8,98	7,44

	Soluciones	
	19	20
Cocina1	47	48
Lavavajillas1	60	60
Cocina2	74	74
Lavavajillas2	78	78
Lavadora	17	14
Secadora	21	18
Plancha	93	88
Vehículo eléctrico	95	95
Potencia necesaria (W)	3700	3700
Índice de no satisfacción	21	19
Coste (€)	2,538	2,579
Ahorro (%)	4,59	3,05

A.4.3 Caso residencial 3

	Soluciones								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Cocina1	32	34	44	44	44	44	44	44	44
Lavavajillas1	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Cocina2	44	44	69	70	72	73	74	74	74
Lavavajillas2	64	64	96	96	96	96	96	91	90
Lavadora	91	91	47	48	48	48	48	48	48
Secadora	95	95	61	62	63	63	63	61	63
Plancha	96	96	64	64	65	64	65	65	65
Vehículo eléctrico	94	96	94	94	94	94	94	94	94
Aire acondicionado	32	32	32	32	32	32	32	32	32
Potencia necesaria (W)	5700	5000	4200	4200	4200	4200	4200	4200	3700
Índice de no satisfacción	82	78	68	66	62	60	58	56	54
Coste (€)	4,012	4,017	4,241	4,241	4,242	4,244	4,246	4,258	4,268
Ahorro (%)	34,91	34,83	31,20	31,20	31,18	31,15	31,12	30,92	30,76

	Soluciones								
	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Cocina1	44	44	46	46	47	48	46	47	48
Lavavajillas1	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Cocina2	74	74	74	74	74	74	74	74	74
Lavavajillas2	89	88	89	88	88	88	81	78	78
Lavadora	48	48	48	48	47	48	47	47	40
Secadora	63	63	61	61	60	58	51	51	49
Plancha	65	65	62	62	61	60	64	59	61
Vehículo eléctrico	94	94	94	94	94	94	92	92	92
Aire acondicionado	32	32	32	32	32	32	60	60	60
Potencia necesaria (W)	3700	3700	3700	3700	3700	3700	4500	4500	4500
Índice de no satisfacción	52	50	48	46	44	42	34	32	30
Coste (€)	4,277	4,287	4,362	4,372	4,414	4,462	4,791	4,835	4,875
Ahorro (%)	30,61	30,45	29,23	29,07	28,39	27,61	22,27	21,56	20,91

